УДК 662.997

Моделирование теплоизвлечения из одиночной геотермальной скважины (методы коаксиального теплообмена)

А.П. Корчагина[1,2], А.В. Кирюхин[2,1]

[1]*Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга, Петропавловск-Камчатский, Россия*
korchaginaap@kamgu.ru
[2]*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия*

Скважина R27, расположенная вблизи Вилючинских источников, в течение 40 лет использовалась в режиме самоизлива с расходом около 1 кг/с и температурой 75 ℃ для теплоснабжения спортивно-туристического комплекса, до снижения уровня в ней. Одним из вариантов решения проблемы теплоснабжения является использование методов коаксиального теплообмена на базе существующей скважины с подачей воды из холодного источника 6 ℃, расположенного выше по рельефу. Для моделирования условий эксплуатации применяется TOUGH2 термогидродинамическое моделирование в осесимметричной постановке и рассмотрены два метода коаксиального теплообмена: 1. Модель коаксиальной геотермальной системы; 2. Модель открытой коаксиальной системы с пакером. Установлена возможность длительной устойчивой эксплуатации с расходом циркуляции 0.2 кг/с и температурой на выходе 38.72 ℃ и 50.10 ℃ соответственно.

Modeling Heat Extraction from a Single Geothermal Well (Coaxial Heat Transfer Methods)

Anastasia P. Korchagina[1,2], Alexey V. Kiryukhin[2,1]

[1]*Vitus Bering Kamchatka State University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*
[2]*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk Kamchatsky, Russia*

Well R27, located near the Vilyuchinsky springs, was used for 40 years in a self-flowing mode with a flow rate of approximately 1 kg/s and a temperature of 75 ℃ to supply heat to a sports and tourism complex, until the water level in the well decreased. One solution to the heat supply problem is the use of coaxial heat exchange methods based on an existing well with water supplied from a cold spring of 6 ℃, located upstream. TOUGH2 thermohydrodynamic modeling in an axisymmetric setting is used to simulate operating conditions, and two coaxial heat exchange methods are considered: 1. Coaxial geothermal system model; 2. Leaky borehole coaxial geothermal system with packer. The possibility of long-term stable operation with a circulation flow rate of 0.2 kg/s and an outlet temperature of 38.72 ℃ and 50.10 ℃, respectively, was established.

Данные реального объекта

Скважина R27 расположена на северо-северо-восточной части Северо-Мутновской вулкано-тектонической зоны (52.65514° с.ш. 158.21907° в.д.). Максимальная глубина скважины при бурении составила 295 м, диаметры бурения изменяются по глубине скважины от 394 мм до 215 мм. По данным геолого-гидрогеологического разреза скважины в качестве основной породы представлены габбро-диориты [1]. Скважина характеризуется термальными водами сульфат-гидрокарбонат-хлоридными кальций-натриевыми с магнием и калием в катионной части состава [2].

Начиная с 2012 г. на скважине проводятся постоянные наблюдения и измерения параметров. На рис. 1 представлена термограмма скважины, данные которой были взяты в качестве исходных параметров для моделирования.

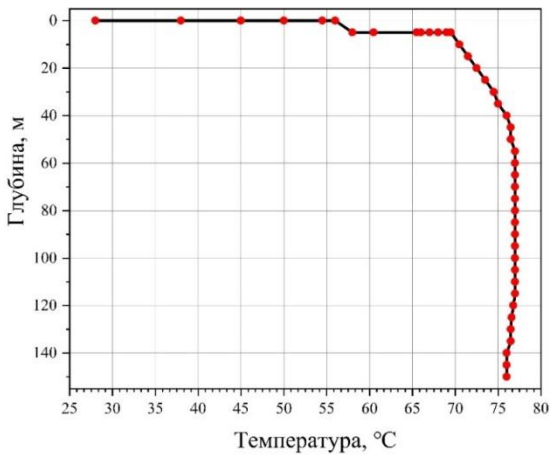


Рисунок 1 – Термограмма скважины R27

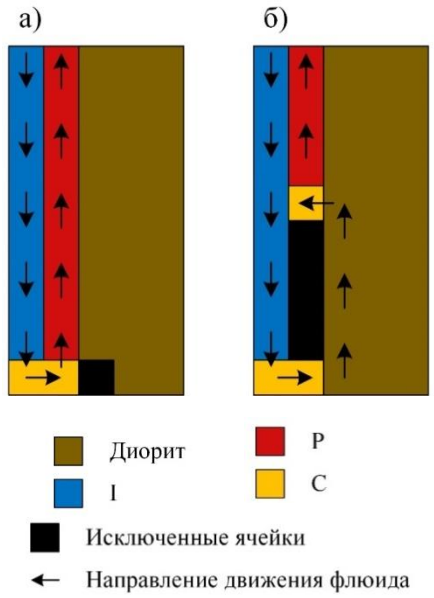


Рисунок 2 – Схематичное представление зонирования модели 1 (а) и модели 2 (б)

Моделирование объекта исследования

Для решения поставленных задач в ходе работы были рассмотрены две модели для извлечения тепла из скважины R27: 1. Модель коаксиальной геотермальной системы (рис. 2 а); 2. Модель открытой коаксиальной системы с пакером (рис. 2 б). Создание и расчет моделей проводился в программном комплексе PetraSim с численным симулятором TOUGH2 [3].

Моделируемый объект обеих моделей по форме представляет собой цилиндр, который задан в программе с помощью равномерно увеличивающейся радиальной сетки по оси 0X из 360 элементов. Внешний радиус модели составляет 50 м, глубина моделируемой подземной части равна 300 м. Параметры, определяющие радиальную сетку по оси 0X (n = 12, f = 1.754), подобраны таким образом, что ширина первой от центра ячейки и сумма первой и второй от центра ячеек соответствует радиусам общепринятых обсадных труб для скважин (d_1 = 90 мм, d_2 = 245 мм). По оси 0Z задана равномерная сетка из 30 ячеек. по оси 0Y ширина модели равна 1 м. В качестве модуля состояния флюидов для моделирования выбран EOS1 (вода).

Для описания моделей были выделены четыре материала. В моделях допущены упрощения в части грунтов окружающих скважину, поэтому материалом модели, характеризующим породу, был выбран диорит как преобладающий по данным геолого-гидрогеологического разреза скважины R27. Ячейкам определенных для инжекционной и эксплуатационной скважины был присвоен материал с высокой пористостью и проницаемость по оси 0Z. Так как границы между инжекционной и эксплуатационной скважинами, а также породой заданы в неявном виде, то для материала скважин проницаемость по оси 0X была принята достаточно низкой во избежание перетоков флюида между доменами. Для удобства и большей наглядности материал, присвоенный ячейкам инжекционной скважины, получил название I, а материал, присвоенный ячейкам эксплуатационной скважины, получил название P. Для сообщения скважин между

собой и возможности перетока флюида из скважины в породу и обратно в модели 2 на основе свойств материала скважин был задан четвертый материал С, характеризующийся высокой проницаемостью в радиальном направлении. Материалы и их свойства приведены в табл. 1.

Таблица 1. Материальные свойства

Материал	Плотность	Пористость	Проницаемость			Теплопроводность	Удельная теплоемкость
			x	y	z		
	кг/м^3	-	м^2			Вт/(м·°С)	Дж/(кг·°С)
Диорит	2810	0.2	$1\cdot10^{-13}$	$1\cdot10^{-13}$	$1\cdot10^{-13}$	3.0	1000
I	2810	0.99	$1\cdot10^{-19}$	$1\cdot10^{-13}$	$1\cdot10^{-5}$	0.6	4200
P	2810	0.99	$1\cdot10^{-19}$	$1\cdot10^{-13}$	$1\cdot10^{-5}$	0.6	4200
C	2810	0.99	$1\cdot10^{-5}$	$1\cdot10^{-13}$	$1\cdot10^{-5}$	0.6	4200

Исходные условия моделей заданы с помощью значения температуры T 75 °C и линейной функции давления от координаты по оси 0Z: $P = 5.0 \cdot 10^4 - 1.0 \cdot 10^4 \cdot z$, Па. В качестве граничных условий для слоя ячеек, находящихся на поверхности моделей и соприкасающихся с атмосферным воздухом, были заданы фиксированные параметры: давление ($1.0 \cdot 10^5$ Па) и температура (13 °C). Для имитации теплового потока характерного для месторасположения скважины R27 параметры крайнего от центра столба ячеек (давление и температура) были зафиксированы во время расчета и не изменялись.

Инжекционная скважина задана в промежутке от 0 до −10 м и имеет параметры расхода и энтальпию 0.2 кг/с и 25 кДж/кг соответственно. Эксплуатационная скважина задана также в промежутке от 0 до −10 м и определена такими параметрами, как индекс продуктивности ($1 \cdot 10^{-10}$ м^3) и давление ($1.0 \cdot 10^5$ Па). Материальные свойства ячеек, относящихся к скважинам, описаны выше. В модели 1 ввиду высокой проницаемости в радиальном направлении материала, заданного для сообщения скважин между собой, для исключения оттока флюида через соседнюю ячейку было принято решение исключить ее из модели. В модели 2 для имитации пакера ячейки эксплуатационной скважины на глубине от −200 до −290 м исключены из модели, а ячейке, через которую флюид возвращается из породы в эксплуатационную скважину, присвоен материал С. Более наглядно распределение материалов в моделях изображено на рис. 2.

Результаты моделирования и обсуждение

При вычислении модели 1 и модели 2 за время расчета (20 лет) были достигнуты установившиеся режимы. На рисунке 3 представлены зависимости энтальпии флюида, выходящего из эксплуатационной скважины, от времени расчета модели.

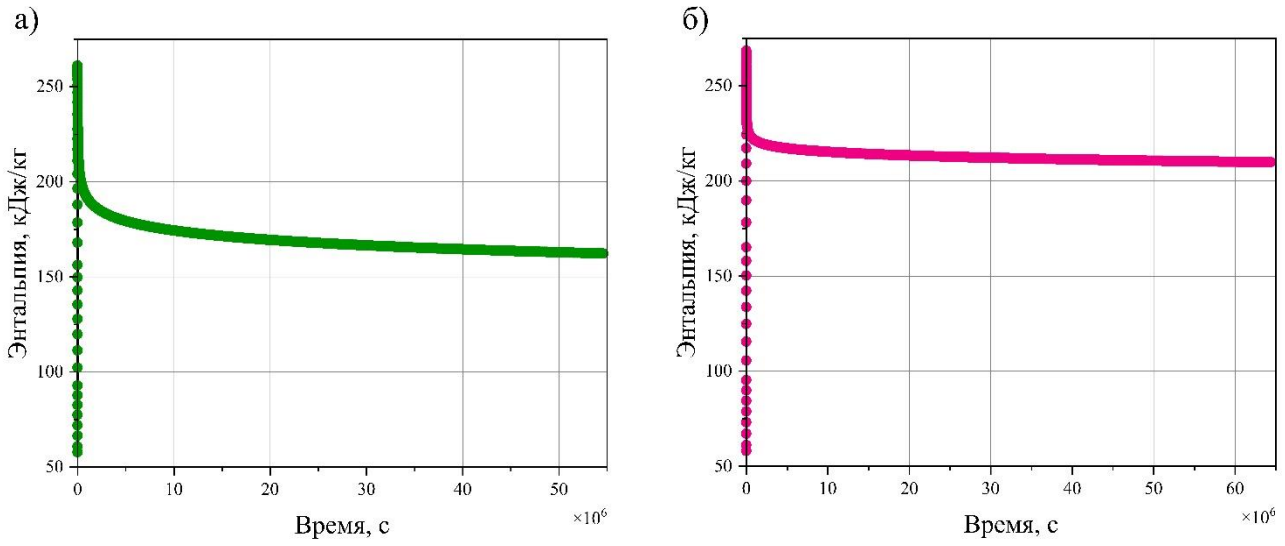


Рисунок 3 – Зависимость энтальпии флюида эксплуатационной скважины модели 1 (а) и модели 2 (б) от времени

По итогам моделирования значение энтальпии флюида в установившемся режиме составило для модели 1 – 162.21 кДж/кг, для модели 2 – 209.80 кДж/кг. Следовательно, при давлении эксплуатационной скважины $1.0 \cdot 10^5$ Па температуры воды составляют 38.72 ℃ и 50.10 ℃ соответственно. По данным результатам однозначно видно, что решение задачи теплоизвлечения из одиночной скважины гораздо лучше решается при применении модели открытой коаксиальной системы с пакером за счет увеличения проходимого флюидом пути сквозь прогретые окружающие грунты. Достигнутый результат в виде температуры воды 50.10 ℃ при расходе 0.2 кг/с позволяет говорить о возможности восстановления теплоснабжения на территории расположения рассматриваемой скважины.

В дальнейшем на основе этой работы планируется рассмотреть другие низкотемпературные скважины, находящиеся на территории Камчатского края, в качестве объектов для добычи теплоэнергии. Также на основе данной модели планируется исследовать физико-химическое взаимодействие вода-порода в рассматриваемом регионе.

Исследования выполнены при поддержке межведомственной программы комплексных научных исследований Камчатского полуострова и сопредельных акваторий, реализуемой ФГБОУ ВО КамГУ им. Витуса Беринга (проект № FZSS-2025-0008).

Список литературы

1. *Кирюхин А.В.* Связь локальной сейсмичности в Северо-Мутновской вулканотектонической зоне с аномальным изменением устьевого давления на скважине Родниковая / *А.В. Кирюхин, А.Ю. Поляков, И.Ф. Делемень* // Вулканизм и связанные с ним процессы: материалы ежегодной конференции. 2014. С. 176–180.

2. *Кирюхин А.В.* Геотермофлюидомеханика гидротермальных, вулканических и углеводородных систем / *А.В. Кирюхин*. Санкт-Петербург: Эко-Вектор Ай-Пи. 2020. 431 с.

3. PetraSim Geothermal Modeling Software [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.petrasim.com.